

水面波の共振により水底に形成されるウェーブリップル

河内一男*¹ 樋浦貞吉*² 鷹巣大城*³ 三谷忠生*⁴

水槽実験によりウェーブリップルをつくり、形成条件を検討した。その結果、ウェーブリップルは水面波の共振に伴う水槽底面の定常波の腹部に強く形成されることが分かった。

I はじめに

最近、新潟県小須戸町矢代田の新津丘陵西麓の第四紀層中から、ウェーブリップルと呼ばれる小堆積構造が見いだされている(図1)。ウェーブリップルとは、波が砂質堆積物の表層を動かしてつくる規則的なうねり模様である^{1) 2) 3)}。筆者らはこれまで、自作の堆積実験装置により地層モデルの教材化を進めてきた^{4) 5)}が、最近になって新たにウェーブリップル(以下実験で発生させるウェーブリップルをWRと略記する)発生用の実験用水槽を製作した⁶⁾。これは、京都府立洛東高等学校の鈴木一久氏の装置⁷⁾を参考にしたものである。今回、この水槽を用いて、水面波の要素、砂の粒度および水底に生じるWRの形状等の関係を調べた。

小論では、この実験が地学分野のみならず物理分野でも有効な新教材であることを示すとともに、水槽の底に生じるWRは表層の水面波が共振を起こしたときに特定の位置に形成されることを述べる。

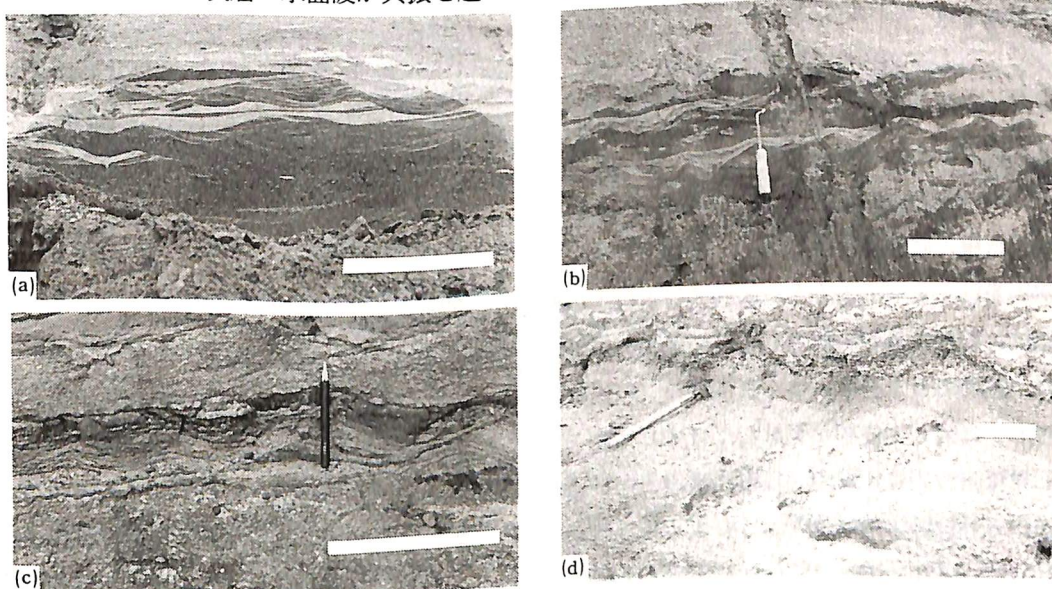


図1 新潟県小須戸町矢代田の兎谷層中のウェーブリップル。(a)ウェーブリップルの形成後、粘土層がこれを覆っている。形成時期が2～3回あることが分かる。(b)リップルの直上はシルト層である。(c)中粒～粗粒砂のウェーブリップル。(d)波長80cm～100cmのグラベルデューン。

*1・*2 県立教育センター *3 北魚沼地区理科教育センター *4 県立三条高等学校

II 表層の水面波の共振と水槽底面に生じる振動

箱形的水槽の一方から一定の周期で波を発生させ続けると、反対側の壁で反射してくる波と発生する波が共振を起こし、一定波長の定常波が形成される。手で水槽の長さと同じ波長の波を発生させる場合は、一方の端で発生させた孤立波が他端に達した瞬間に次の孤立波を送り出す要領を繰り返す(図2)。もっとも、図2のような山の部分が急峻な孤立波は、進行する波であるが、中央部と両端が常に強めあって共振を起こしていることから、定常波の一種とみなすことができる。図3はこれを模式的に示したものである。

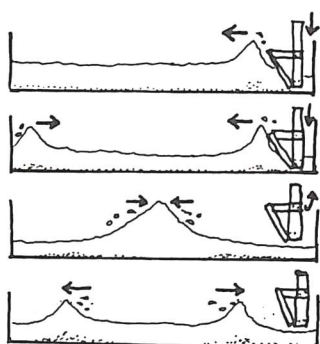


図2 手で「定常波」を発生させるようす。この場合は波長＝水槽の長さの倍振動である。

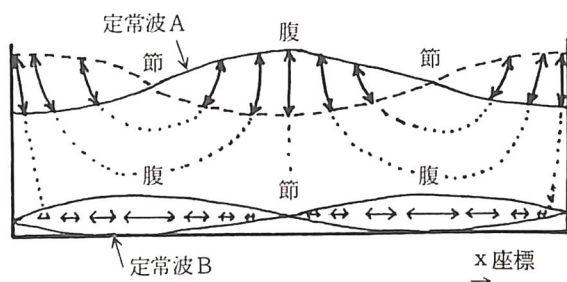


図3 水面と水底にできる定常波の違い。水面の定常波の腹の部分が水底にできる定常波では節になっていることが分かる。

一般に、波長が水深に対して十分長いとき、波長を l (m)、水の深さを h (m) とすれば、波の速さ v および周期 T は

$$v = \sqrt{gh} \text{ (m/s)}$$

$$T = l / \sqrt{gh} \text{ (s)} \quad [\text{ただし } g = 9.8 \text{ m/s}^2]$$

となることが知られている。したがって、波長が 2.0 m、水深 0.1 m の場合は造波周期が約 2.0 s である。このとき、水槽の底面に密度の小さい粒子(ガラス質火山灰等)を薄くまいておくと、底面での水粒子の動きを間接的に観察することができる。図3の矢線で示すように、底面では水面波のつくる定常波(以後定常波 A と呼ぶ)に対して位相が半波長だけずれて腹と節が逆転した粗密波的な定常波(以後定常波 B という)ができる。これは図中の流線で示したような水粒子の移動が起きているためである⁸⁾。つまり、 x 座標で定常波 A の節(定常波 B では腹)に相当する部分は速度の鉛直成分が 0 で水平成分が最大、また x 座標で定常波 A の腹(定常波 B では節)に相当する部分は水平成分

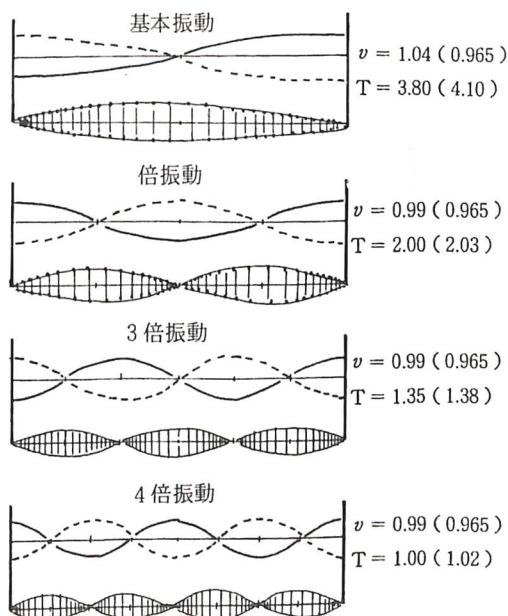


図4 基本振動～4倍振動の水面と水底の定常波の腹および節の位置。

が0で鉛直成分が最大になることによっている。

箱形の水槽の表面（上段）と底面（下段）に生じる水の定常波の周期（波長）による違いを図4のa～dに示す。上段の波線は実線の状態になった波の半周期後の状態を表現している。下段の定常波は水平方向の成分のみの波で、粗密波であるが、定常波の腹と節の位置を分かりやすく示すために図のように描いた。波の速度、周期等の値は水深が約9.5 cmのときの実測値（（ ）内は $v = \sqrt{gh}$, $T = l/\sqrt{gh}$ としたときの理論値）である。

Ⅲ 水面波の共振（定常波）によって生じるWR

ここでは、水槽に細粒砂を敷いて前章と同様の波を発生させると、定常波に対して規則的な波形模様（WR）が水槽底に形成されることを示す。なお、この実験では、全て深さ 20 cm、長さ 200 cm、幅 4.0 cmの自作の水槽⁶⁾を使用した。

1 WRとクントの縞

図5は水槽の底面に1 cm程度の厚さで細粒砂を敷き、倍振動させたときにできたWRの一部である。また、図6ではこのWRの全体像とこのときの定常波A、Bを模式的に示した。WRは定常波Bの腹の部分で間隔、高さともに最大で、節に近づくほど小さくなり、やがて消滅している。

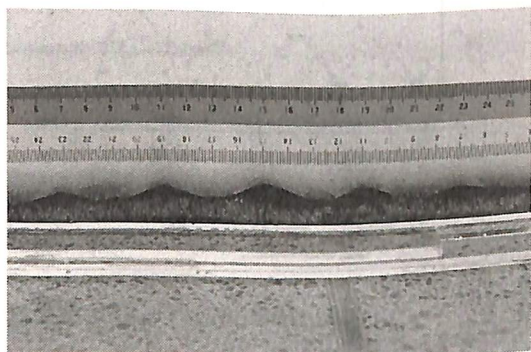


図5 水槽で生じたウェーブリップル。細粒砂、倍振動。

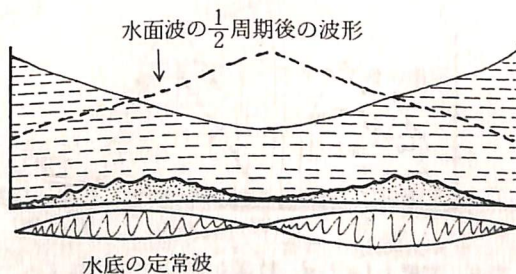


図6 水槽でできるウェーブリップルの全体像。水面の定常波の節の部分が波長、波高がともに最大で、砂も集積する。

この波形模様は、実験室で音の速さを測る方法として知られているクント（Kundt）の実験の縞模様に相当するものと思われる。クント縞の成因は未解明⁹⁾であるが、定常波を視覚化する⁹⁾という点では、この水槽実験の方がより簡便である。

2 WRの形成条件

孤立波の速度に関係する水深、定常波の波長に関係する造波周期さらには砂の粒度・密度等を変えたときのWRの形状の違いを調べた。図7～9は黒丸がWRのできている位置（横軸）と隣のWRとの間隔（縦軸）を、グラフ下部の縦棒はWRの位置（横軸）とWRの高さ（縦軸）をそれぞれ示している。

(1) 水深による違い（図7）。

水槽の高さと造波装置の機能上の制限があるため、水深は12.5 cmと6.5 cmで比較した。砂は平均粒径 0.188 mm（細粒砂）を用い、周期 2.0 s の倍振動の定常波を発生させた。

(2) 定常波の周期(波長)を変えた場合(図8)

水深と砂の粒度を一定(水深約9.5 cm, 平均粒径0.188 mm)にし, 定常波の周期を変えて, 倍振動, 3倍振動, 4倍振動を示した。

(3) 砂の粒度および密度による違い(図9)

ここではガラス質火山灰(平均粒径0.75 mm, 密度1.1 g/cm³)と石英質粗粒砂(平均粒径0.75 mm, 密度2.5 g/cm³)を示した。

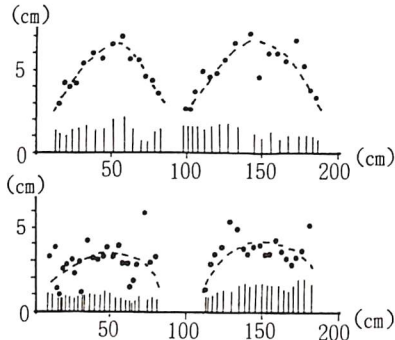


図7 水深12.5 cm(上)と水深6.5 cm(下)のときの倍振動での比較。黒丸はリップルの間隔(波長)棒線は底面からのリップルの高さ。

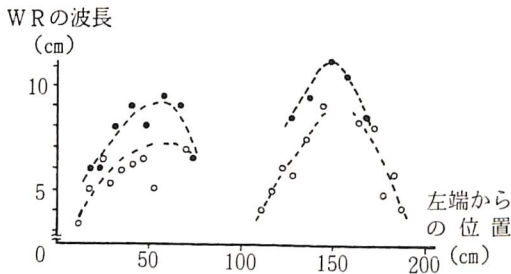


図9 密度1.1 g/cm³, 粒径0.75 mmの火山灰(白丸)と密度2.5 g/cm³, 粒径0.75 mmの粗粒砂(黒丸)の場合

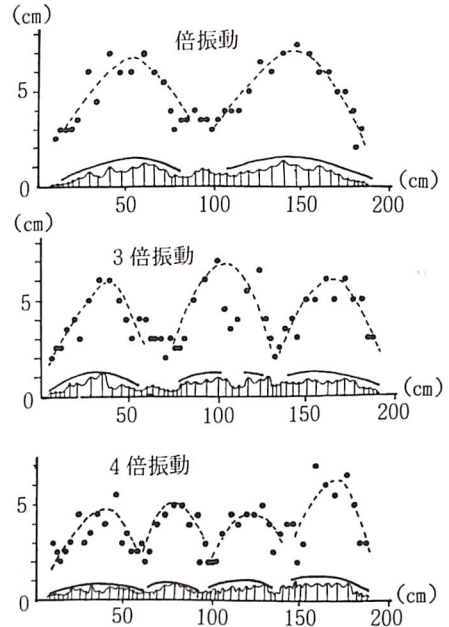


図8 平均粒径0.188 mmの細粒砂で水面波の波長を変えた(2倍~4倍振動)場合のウェーブリップル

注. グラフの横軸は水槽の左端(造波器の無い方)からの距離を表している。

これらをまとめると次のようになる。

- 水深が大きいほど, すなわち孤立波の速度が大きいほどWRの間隔が大きく, 山は高い(図7)。
- 波の速度が一定のとき定常波の波長が長いほどWRの間隔が大きく, 山は高い(図8)。
- 砂の粒径が大きいほどWRの間隔は大きくなる。
- 粒径が等しい, 密度1.1 g/cm³の火山灰と2.5 g/cm³の石英砂ではWRの間隔に大きな差は見られない(図9)。

また, 密度約2.5 g/cm³の石英砂については粒径が1 mmを越えるとWRは発生しなかった。

なお, 水槽の深さと長さを大きくして定常波のエネルギーを増した場合, どうなるかについては不明である。

3 WRが成長する機構

WRが形成され成長する過程をビデオの録画画面により調べ, これを図10~12のようにモデル化した。これによると

- (1) 定常波の諸要素，定常波の中の位置および砂の種類（粒度，密度）に応じた特有の幅（前項参照）で底面の砂が振動する（図10）。
- (2) 振動の幅よりわずかに狭い間隔でひとたびWRが形成されると，図11の①～④に示した往復運動と回転流によりWRのピークが成長していく。
- (3) 砂は定常波Bの腹部に集まる。このため腹部ではWRの間隔，高さともに最大となる（図12）。



図10 底面の砂の移動



図12 砂の分布の模式図

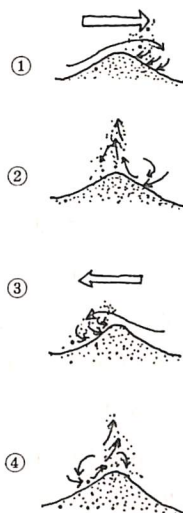


図11 ウェーブリップルの成長

4 進行波の場合について

共振が起きないとき，すなわち定常波が生じない周期のときは，発生する波と他端から反射してくる波が干渉し合うため水面波は減衰し，底面での粒子の振動はほとんど生じない。また，多端にスポンジを装着して連続的に孤立波を送り続けると，底面の粒子は振動をするがそのエネルギーは小さく，WRは形成されなかった。

5 定常波の波長とWRの波長との関係

図13で，水槽実験により形成された粗粒砂と細粒砂の場合についてWRの波長と定常波の波長の関係を表した。水深はいずれも9.5cmである。この曲線が水力学的にどのような意味を持つのかについて，現時点では分からない。しかし，水面波の波長とWRの波長の比と水深，砂の粒度の関係は得ることができた。今後，地層中のウェーブリップルや現在の海底でのリップルマークさらには暴風時の波の波長と水深等のデータを対比する必要がある。

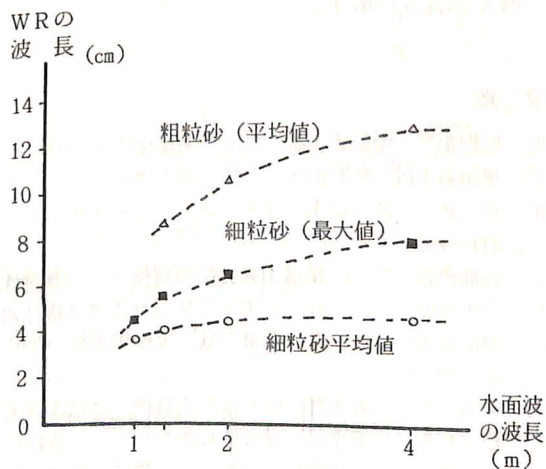


図13 水面波の波長とWRの波長の関係

IV まとめと今後の課題

WRは、この水槽実験で見る限り、水面波が共振を起こしたときのみ共振によって生じた定常波の諸要素に応じて形成される。とくに底面に生じる定常波Bの腹部に強く形成されるために、水槽の底面に間欠的に生じ、WRの波長もこれと調和的になる。これはクントの実験の縞模様と同じ成因のようである。

地層中に見られるウェーブリップルに、筆者らがこの実験で得たようなWRと同じ特徴のあるものを見いだせば、海底で生じるウェーブリップルにも定常波によって生じるクント縞と同じ成因を考えることができる。実際の海岸で岸にあたった波が水槽のように反射して沖からくる次の波と共振を起こすとすれば、ウェーブリップルの存在がある種の海岸地形を示唆することになるし、岸からの距離、水深、水面波の波長、周期なども算出可能になるかもしれない。

しかし、本研究はまだ緒についたばかりであり、図1で示した新津丘陵のウェーブリップルについて、波長や振幅等の測定データは現在のところ十分に得られていない。また、増田ほか²⁾はウェーブリップルについて水力学的解析を行い、その形態等から堆積環境を推定しているが、これについても未検討である。今後、筆者らの水槽実験や新津丘陵のウェーブリップルについてもこの方法で追試してみる必要がある。さらに、水槽の長さや深さを増した実験により、グラベルデューンやハンモッキー層理の成因についても同様のことがいえるのかどうかを検討して行きたい。

謝辞 茨城大学の牧野泰彦氏には新津丘陵の露頭でウェーブリップルについていろいろとご教示いただいた。大阪大学の増田富士雄氏、新潟大学の立石雅昭氏からはウェーブリップルや堆積相解析に関する資料を提供していただくとともに、ご指導ご助言をいただいた。実験用水路製作に関しては、その規格から付帯部品に至るまで京都府立洛東高等学校の鈴木一久氏の研究成果を参考にさせていただいた。また、当教育センターの麯澤祐一氏にはクントの実験についてご教示いただいた。末尾ながらこれらの方々に厚く感謝致します。

文 献

- 1) 牧野泰彦, 増田富士雄: 古東京湾堆積物中のウェーブリップルの特徴, 地学雑, Vol.95 (1985), p.241~253.
- 2) 増田富士雄, 牧野泰彦: 古東京湾のウェーブリップル形成の波浪条件, 地学雑, Vol.96 (1986), p.23~45.
- 3) 桂 雄三, 砂村継夫: ストーム・ウェーブリップル・河川流出サスペンション, 月刊地球, No.109 (1988), p.441~445.
- 4) 樋浦貞吉 (MS.): 堆積実験装置の製作とその教材性, 新潟県立教育センター 初等理科選択研修 (1984)
- 5) 鷹巣大城 (MS.): 身近な露頭に見られる堆積構造のモデル化, 新潟県立教育センター 地学選択研修 (1991)
- 6) 樋浦貞吉, 河内一男, 鷹巣大城: 実験用水路の製作とその活用, 新潟県立教育センター研究報告第140号 (1993), p.45~48.
- 7) 鈴木一久: 手製水路の作り方と実験例, 堆積学研究会報, 37号 (1992), p.85~92.
- 8) 松田和久, 吉田雅巳: 誤解されがちなクント管内の定在音波, 物理教育, Vol.33 (1985), p.336.
- 9) 竹内直一: 気柱共鳴管中の音の定在波の視覚化, 新潟県立教育センター研究報告第137号 (1992), p.5~12.